

1. Abstract of **DE 101 13 787 (C1)**

The logic circuit device (1) has at least one magnetoresistive element (2) with hard magnetic and soft magnetic layers and an associated conductor (3) with at least 2 signal terminals (A,B) for providing a magnetic field for switching the magnetization of the soft magnetic layer of the magnetoresistive element. The latter has at least one further magnetic layer, providing a magnetic offset field affecting the magnetization of the soft magnetic layer.



⑮ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑯ **Patentschrift**
⑰ **DE 101 13 787 C 1**

⑲ Int. Cl. 7:
H 01 L 27/22
H 03 K 19/18
G 11 C 11/15

⑳ Aktenzeichen: 101 13 787.7-33
㉑ Anmeldetag: 21. 3. 2001
㉒ Offenlegungstag: -
㉓ Veröffentlichungstag der Patenterteilung: 5. 9. 2002

DE 101 13 787 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑲ Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

㉔ Erfinder:
Richter, Ralf, 91054 Erlangen, DE; Wecker, Joachim,
Dr., 91341 Röttenbach, DE

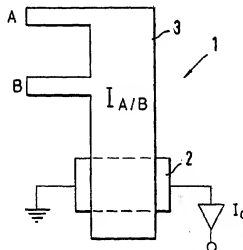
㉕ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 100 53 206 C1
DE 43 26 999 A1
US 60 34 887

Jun Shen: Logic Devices and Circuits Based on
Giant Magnetoresistance in IEEE Transactions on
Magnetics, 33(1997)6, pp. 4492-449;
William C. Black, Jr. and Bodhisattva Das: Pro-
grammable logic using giant-magnetoresistance
and
spin-dependent tunneling devices (invited) in
Journal of Applied Physics, 87(2000)9, pp.6674-
6679;

⑳ Logikschaltungsanordnung

㉖ Logikschaltungsanordnung, mit mindestens einem
magnetoresistiven Element mit einer hartmagnetischen
und einer weichmagnetischen Schicht, dem ein Leiter mit
mindestens zwei Signalanschlüssen zugeordnet ist, mit-
tels dem im stromdurchflossenen Zustand ein auf das
magnetoresistive Element einwirkendes Magnetfeld er-
zeugbar ist, mittels dem die Magnetisierung der weich-
magnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements
umschaltbar ist, wobei das magnetoresistive Element (2)
wenigstens eine magnetische Schicht (8) aufweist, die ein
im Wesentlichen parallel oder antiparallel zur leichten
Richtung (L) der weichmagnetischen Schicht (4) stehen-
des magnetisches Offset-Feld (H_{offset}) erzeugt.



DE 101 13 787 C 1

[0001] Die Erfindung betrifft eine Logikschaltungsanordnung, mit mindestens einem magnetoresistiven Element mit einer hartmagnetischen Schicht und einer weichmagnetischen Schicht, dem ein Leiter mit mindestens zwei Signalanschlüssen zugeordnet ist, mittels dem im stromdurchflossenen Zustand ein auf das magnetoresistive Element einwirkendes Magnetfeld erzeugbar ist, mittels dem die Magnetisierung einer weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements umschaltbar ist.

[0002] Aus der Veröffentlichung "Programmable logic using giantmagnetoresistance and spin-dependent tunneling devices (invited)" von William C. Black, Jr. and Bodhisattva Das, Journal of applied physics, Band 87, Nr. 9 vom 01.05.2000, ist eine feldprogrammierbare Logikschaltungsanordnung bekannt, welche mehrere magnetoresistive Elemente und zugeordnete Referenz-Elemente umfasst. Der Typ der Logikschaltung, ob es sich also um eine Schaltung mit einer OR-, NOR-, AND- oder NAND-Funktion handelt, wird durch entsprechende Programmierung eingestellt, wozu man sich der harten und der weichen Schicht der magnetoresistiven Elemente, also der Referenz-Schicht, bedient, die an die ein entsprechender Strom angelegt wird, der zur Ausrichtung derselben dient. Die Funktionsart wird durch die jeweilige Einstellung an einem magnetoresistiven Element sowie seinem zugeordneten Referenzelement definiert.

[0003] Zum einen ist die Art der Funktionsprogrammierung aufwendig, zum anderen sind hierfür jeweils mindestens drei Elemente erforderlich, um ein Logikgrundelement zu bilden.

[0004] Aus der DE 43 26 999 A1 ist eine Vorrichtung zum magnetfeldgesteuerten Schalten zu entnehmen, bei der die Magnetisierung einer weichmagnetischen Schicht eines GMR-Schichtensystems mit Hilfe eines externen, von einer Schalmagnetspule erzeugten Magnetfeldes zu drehen/zu schalten ist. Die vorgenannten Logik-Funktionen sind dabei nicht ohne weiteres mit einer einzigen derartigen Vorrichtung zu realisieren.

[0005] Aus der US 6,034,887 geht ferner ein magnetoresistives Schichtensystem mit einer Tunnelbarrierschicht hervor, mit dem eine Logik-Schaltungsanordnung mit den eingangs genannten Merkmalen aufgebaut werden ist. Verschiedene Ausgestaltungsmöglichkeiten von Logik-Schaltungsanordnungen unter Verwendung solcher magnetoresistiver Schichtensysteme sind aus "Journ. Appl. Phys.", Vol. 87, No. 9, 1.5.2000, Seiten 6674 bis 6679 zu entnehmen.

[0006] Ferner ist aus der nicht-veröffentlichten DE 100 53 206 C1 eine Logikschaltungsanordnung der eingangs genannten Art bekannt, bei der mindestens ein weiterer bestrombarer Leiter vorgesehen ist, mittels dem bedarfsabhängig ein im Wesentlichen senkrecht zur Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht stehendes weiteres Magnetfeld erzeugt werden kann. Dieses senkrecht stehende weitere Magnetfeld ermöglicht es, bedarfsabhängig die Koerzitivfeldstärke der weichmagnetischen Speicherschicht zu variieren. Liegt kein senkrecht stehendes Magnetfeld an, so ist die zum Umschalten erforderliche Koerzitivfeldstärke hoch, das heißt, es müssen an beiden Signalanschlüssen entsprechende Signale anliegen, so dass additiv ein hinreichend hoher Strom über den Leiter fließt, der ein hinreichend hohes Magnetfeld erzeugt, das eine Feldstärke besitzt, die gleich oder größer der Koerzitivfeldstärke ist. In diesem Fall ist eine AND-Logik realisiert. Wird nun das senkrecht stehende Magnetfeld erzeugt, so verringert sich die Koerzitivfeldstärke. Zum Drehen ist es dann bereits ausreichend, wenn le-

diglich ein Signal und damit nur der halbe Strom über den Leiter fließt, das heißt, es ist ein niedriges Feld zum Umschalten ausreichend. In diesem Fall wäre eine OR-Funktion realisiert, da jedes der Signale individuell zum Schalten ausreicht.

[0007] Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, eine feldprogrammierbare Logikschaltung anzugeben, bei der auf einfache Weise die Funktion eingestellt werden kann.

[0008] Zur Lösung dieses Problems ist bei einer Logikschaltungsanordnung der eingangs genannten Art erfindungsgemäß vorgesehen, dass das magnetoresistive Element wenigstens eine weitere magnetische Schicht aufweist, die ein auf die Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht einwirkendes magnetisches Offset-Feld erzeugt.

[0009] Über das in beliebiger Richtung zur Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht stehende Offset-Feld kann das Schaltverhalten des Logikelements je nach Feldausrichtung beeinflusst werden.

[0010] Das über die erfindungsgemäß vorgesehene weitere magnetische Schicht erzeugbare magnetische Offset-Feld kann entweder im Wesentlichen parallel oder antiparallel zur Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht gerichtet sein. Das heißt, je nach dessen Ausrichtung wirkt es unterstützend und damit die Koerzitivfeldstärke, die zum Drehen der Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht in die leichte Richtung erforderlich ist, erniedrigend (bei paralleler Ausrichtung). Oder das Offset-Feld erhöht die erforderliche Koerzitivfeldstärke im Falle einer antiparallelen Ausrichtung. Aufgrund der hierdurch erreichbaren programmierungsabhängigen Einstellmöglichkeit der Koerzitivfeldstärke kann folglich festgelegt werden, ob zum Drehen der Magnetisierung beispielsweise in die leichte Richtung der weichmagnetischen Schicht, die in der Regel parallel zur Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht steht, bereits ein an dem Leiter anliegendes Signal ausreichend ist (OR-Funktion), oder ob beide Signale additiv gegeben werden müssen (AND-Funktion). Anders als bei der in der nicht-veröffentlichten DE 100 53 206 C1 beschriebenen Ausführungsform mit dem senkrecht zur Magnetisierung stehenden Feld, das zu einer schmälerten Hysterese führt, ergibt sich bei der erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung eine Verschiebung der Hysterese je nach Ausrichtung des Offset-Felds zu höheren oder niedrigeren Koerzitivfeldstärken, wobei die Breite der Hysterese jedoch im Wesentlichen gleich bleibt. Ferner kann das Offset-Feld auch im Wesentlichen senkrecht zur Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht stehen. In diesem Fall kommt es zu einer Verschmälerung der Hysterese, wie in der nicht-veröffentlichten DE 100 53 206 C1 beschrieben, jedoch mit dem Vorteil, dass dieses Feld dauerhaft anliegt und nicht durch kontinuierliche Bestromung eines Leiters erzeugt werden muss.

[0011] Insgesamt ist mit der erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung mit der seitens des magnetoresistiven Elements vorgesehenen zusätzlichen magnetischen Schicht zur Erzeugung des Offset-Felds eine einfache Programmierung der gesamten Logikschaltung möglich, da sie lediglich durch entsprechende Einstellung bzw. Ausrichtung der Magnetisierung der magnetischen Schicht zur Erzeugung des Offset-Felds in ihrer Funktion programmiert werden kann.

[0012] Zur einfachen Einstellung der Magnetisierung der magnetischen Schicht und damit zur Definierung der Richtung des Offset-Felds (z. B. parallel, antiparallel oder senkrecht) ist es besonders zweckmäßig, wenn die Magnetisierung der magnetischen Schicht durch wenigstens ein externes Magnetfeld einstellbar ist. Zur parallelen oder antiparallelen Ausrichtung erfolgt dies zweckmäßigerweise durch ein vom stromdurchflossenen Leiter erzeugtes Magnetfeld. Das heißt, zum Programmieren der Logikschaltungsanord-

nung ist lediglich ein hinreichend hoher Strom über den stromdurchflossenen Leiter zu führen, der so bemessen ist, dass die hindurch erzeugte Feldstärke größer ist als die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht, um eine vom Vorzeichen des Stroms und damit der Richtung des erzeugten Magnetfelds abhängige Einstellung der Magnetisierung der magnetischen Schicht vorzunehmen. Die Steuerung der Bestromung des Leiters kann durch eine externe Logiksteuerung erfolgen, die bei einer arrayartigen Ausbildung der Logikschaltungsanordnung mit einer Vielzahl weiterer magneto-resistiver Elemente mit zugeordneten Leitern natürlich die Programmierung sämtlicher einzelner Logikschaltselemente steuert.

[0013] In Weiterbildung des Erfindungsgedankens ist vorgesehen, dass die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht größer als die maximale Feldstärke des zum Schalten der weichmagnetischen Schicht erzeugbaren Magnetfelds ist. Das heißt, die maximale Feldstärke des bei Signalgabe über den Leiter erzeugten Magnetfelds ist stets kleiner als die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht, so dass eine Umprogrammierung der magnetischen Schicht und damit des Offset-Felds im normalen Schalt- oder Speicherbetrieb, wenn eben Signale über den Leiter geführt werden, ausgeschlossen ist. Die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht sollte deutlich größer sein als die maximale Feldstärke des Schaltfelds, z. B. wenigstens um einen Faktor zwei, wobei die Wahl der jeweiligen Feldstärken jedoch im Belieben des Fachmanns steht. Die genaue Wahl der Feldstärke ist experimentell möglich.

[0014] Ferner kann in Weiterbildung des Erfindungsgedankens vorgesehen sein, dass die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht kleiner ist als die Koerzitivfeldstärke einer hartmagnetischen Schicht des magneto-resistiven Elements. Bekanntermaßen verfügt jedes magneto-resistive Element über eine hartmagnetische Referenz- oder Bias-schicht, die ein zentraler Teil eines magneto-resistiven Elements ist. Abhängig von der Stellung der Magnetisierung der weichmagnetischen Schalt- oder Speicherschicht des magneto-resistiven Elements zur Magnetisierung der hartmagnetischen, stabilen und in ihrer Richtung während des normalen Betriebs nicht geänderten Schicht bestimmt sich der Widerstand des magneto-resistiven Elements und damit die Höhe der abgreifbaren Ausgangssignale. Die Funktionsweise derartiger magneto-resistiver Elemente ist bekannt, hierauf muss nicht näher eingegangen werden.

[0015] Nach der genannten Erfindungsgestaltung ist nun sichergestellt, dass die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht kleiner ist als die der hartmagnetischen Schicht. Das heißt, die Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht wird beim Programmieren der magnetischen Schicht von dem hierfür erzeugten Magnetfeld nicht beeinflusst. Auch hier sollte die Koerzitivfeldstärke der hartmagnetischen Schicht deutlich größer sein als die der magnetischen Schicht, z. B. um einen Faktor 10.

[0016] Zusätzlich kann vorgesehen sein, dass die Logikschaltungsanordnung eine Vielzahl von arrayartig angeordneten magneto-resistiven Elementen mit zugeordneten Leitern aufweist, das heißt, sie ist als großes, eine hohe Kapazität aufweisendes Logikarray ausgebildet. Zur Steuerung des Arrays hinsichtlich der Programmierung ist wie bereits beschrieben eine externe Steuerungseinrichtung vorgesehen, die die Programmierfeldkürzung steuert.

[0017] Die magneto-resistiven Elemente selbst können als GMR-(giant magneto-resistive) oder TMR-(tunneling magneto-resistive) Sensoren ausgebildet sein.

[0018] Ferner kann erfindungsgemäß wenigstens ein weiterer Leiter vorgesehen sein, mittels dem ein im Wesentlichen senkrecht zur Magnetisierung der hartmagnetischen

Schicht stehendes Magnetfeld erzeugbar ist. Dieses Magnetfeld ermöglicht es ebenfalls die zum Drehen bzw. Umschalten der Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht erforderliche Koerzitivfeldstärke zu verringern. Der weitere Leiter sowie das über ihn erzeugbare Magnetfeld entspricht in seiner Funktion der, die in der nachveröffentlichten Patentanmeldung 100 53 206,3 beschrieben ist. Wird nun z. B. bei paralleler oder antiparalleler Ausrichtung der Magnetisierung der magnetischen Schicht und damit des Offset-Felds zusätzlich das Magnetfeld über den weiteren Leiter angelegt, das senkrecht dazu steht, so ergibt sich zum einen die aufgrund der parallelen/antiparallelen Ausrichtung resultierende Verschiebung der Hysteresekurve, zum anderen die aus dem senkrecht dazu stehenden Feld des weiteren Leiters resultierende Verschmälerung der Hysteresekurve. Es ist damit noch ein weiterer Freiheitsgrad hinsichtlich der Programmierung gegeben. Für diese Anwendung muss das über den weiteren Leiter erzeugte senkrecht stehende Magnetfeld natürlich kleiner sein als die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht, damit diese nicht ummagnetisiert wird.

[0019] Ein weiterer Vorteil der Verwendung des weiteren Leiters ist ferner der, dass über das mit ihm erzeugbare senkrecht stehende Magnetfeld auch die Magnetisierung der magnetischen Schicht geändert werden kann. Ist diese beispielsweise ursprünglich parallel ausgerichtet, so kann durch ein entsprechend hohes über den weiteren Leiter erzeugtes Magnetfeld die Magnetisierung der magnetischen Schicht senkrecht zur hartmagnetischen Schicht gedreht werden. Es wird dann mittels des Offset-Felds ein kontinuierlich anliegendes Biasfeld erzeugt, das in seiner Richtung dem Magnetfeld entspricht, das beim kontinuierlichen Bestromen des weiteren Leiters erzeugt wird. Der Unterschied ist jedoch, dass durch die senkrechte Einstellung der Magnetisierung der magnetischen Schicht kontinuierlich ein senkrecht Magnetfeld auf die weichmagnetische Schicht einwirkt, ohne dass hierfür der Leiter kontinuierlich zu bestromen ist, während es bei der vorher beschriebenen Ausführung, wo über den weiteren Leiter lediglich ein zusätzliches senkrecht stehendes Magnetfeld zum parallelen oder antiparallelen Feld der magnetischen Schicht erzeugt wird, einer kontinuierlichen Bestromen des Leiters bedarf.

[0020] Ein weiterer beachtlicher Vorteil der Verwendung des weiteren Leiters ist, dass durch Überlagern der Magnetfelder, die beim Bestromen des Leiters, über den die Signale geführt werden, und des weiteren Leiters erzeugt werden, die Magnetisierung der magnetischen Schicht auch in jede beliebige andere Stellung, also in jeden beliebigen Winkel bezüglich der Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht gedreht werden kann.

[0021] Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung sind in der bereits benannten nachveröffentlichten Patentanmeldung 100 53 206,3 beschrieben, auf die ausdrücklich Bezug genommen wird und deren Inhalt in die Offenbarung dieser Patentanmeldung mit einbezogen wird.

[0022] Sowohl die magnetische Schicht wie auch ggf. der weitere Leiter sollten derart dimensioniert und angeordnet sein, dass die von ihnen erzeugbaren Magnetfelder im Wesentlichen homogen auf die weichmagnetische Schicht einwirken, d. h., dass über die Fläche der weichmagnetischen Schicht ein im Wesentlichen homogenes Magnetfeld anliegt, so dass die Koerzitivfeldstärke gleichmäßig über die weichmagnetische Schicht beeinflusst werden kann.

[0023] Weiterhin kann einem oder mehreren magneto-resistiven Elementen ein magneto-resistives Referenz-Element zugeordnet sein, das gleichermaßen aufgebaut ist, also auch sofern ein magneto-resistives Element vorgesehen einen weiteren Leiter umfasst. Dieses Referenz-Element dient

ausschließlich zu Referenzzwecken, hinsichtlich der Feldprogrammierbarkeit, die allein durch die magnetische Schicht und ggf. den weiteren Leiter erzielt wird, trägt das Referenz-Element nichts bei. Gleichwohl ist es zweckmäßig, um Widerstandsvariationen auf bzw. über den Wafer auszugleichen.

[0024] Im Falle einer Kombination des magnetoresistiven Elements mit der erfindungsgemäß vorgesehenen magnetischen Schicht mit einem weiteren, das senkrechte Magnetfeld erzeugenden Leiter ist es zweckmäßig, wenn diesem weiteren Leiter ein Schalt- oder Steuerelement zugeordnet ist, über das die Erzeugung des weiteren Magnetfelds steuerbar ist. Als ein solches Schalt- oder Steuerelement kann jedes beliebige Element dienen, das es ermöglicht, dann, wenn es erforderlich ist einen Strom über den Leiter, der mit einer entsprechenden Stromquelle verbunden ist, zu führen. Als ein solches Schalt- oder Steuerelement kann zweckmäßigerweise eine MRAM-Speicherzelle, also eine Magnet-Access-Memory-Zelle verwendet werden, über deren Zustand der Bestromungsbetrieb des weiteren Leiters definiert wird. Zweckmäßigerweise wird ein Schalt- oder Steuerelement mit nicht flüchtig gespeicherter Schalt- oder Steuerinformation verwendet.

[0025] Weiterhin kann bei Verwendung dieses weiteren Leiters durch diesen ein niedriges Bias-Magnetfeld, das im Wesentlichen kontinuierlich auf das magnetoresistive Element einwirkt, erzeugt werden, wobei das Bias-Magnetfeld niedriger ist als das eigentliche von dem weiteren Leiter erzeugte senkrecht stehende Magnetfeld. Das Bias-Magnetfeld erniedrigt die Koerzitivfeldstärke ebenfalls, jedoch nur gering, was dahingehend von Vorteil ist, als die Hysterese-Kurve "homogener" wird. Man nähert sich einem idealen Schaltverhalten, das Schalten ist schneller möglich. Das magnetoresistive Element bzw. ggf. das Referenz-Element wird also etwas vorgespannt.

[0026] Wegen weiterer Ausgestaltungsformen wird nochmals auf die nachveröffentlichte Patentanmeldung 100 53 206.3 verwiesen.

[0027] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus dem im Folgenden beschriebenen Ausführungsbeispiel sowie anhand der Zeichnungen. Dabei zeigen:

[0028] Fig. 1 eine Prinzipskizze einer Logikschaltungsanordnung,

[0029] Fig. 2 eine Schnittdarstellung des magnetoresistiven Elements mit einer in eine erste Richtung magnetisierten magnetischen Schicht,

[0030] Fig. 3 eine Schnittdarstellung entsprechend Fig. 2 mit einer in eine zweite Richtung magnetisierten magnetischen Schicht,

[0031] Fig. 4 eine Prinzipskizze einer idealisierten Schaltkurve des magnetoresistiven Elements mit Asteroide-Schaltverhalten für das in Fig. 2 gezeigte magnetoresistive Element,

[0032] Fig. 5 eine Prinzipskizze einer idealisierten Schaltkurve eines magnetoresistiven Elements mit Asteroide-Schaltverhalten für das in Fig. 3 gezeigte magnetoresistive Element, und

[0033] Fig. 6 eine Prinzipskizze einer weiteren Logikschaltungsanordnung.

[0034] Fig. 1 zeigt eine erfindungsgemäße Logikschaltungsanordnung 1 bestehend aus einem magnetoresistiven Element 2, beispielsweise einem GMR- oder einem TMR-Element. Dieses magnetoresistive Element ist über geeignete Zuleitungen mit einem Messstrom I_0 bestrombar, wobei die Größe der abgreifbaren Messspannungen abhängig davon ist, wie die Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements zur Magnetisierung

der hartmagnetischen Referenzschicht steht. Die Grundfunktion eines GMR- oder TMR-Elements ist hinreichend bekannt, auf sie muss hier nicht näher eingegangen werden.

[0035] Elektrisch isoliert verläuft quer über dem magnetoresistiven Element 2 ein ebenfalls bestrombarer Leiter 3, der im bestromten Zustand ein Magnetfeld am Ort der weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements 2 erzeugt. Der Strom I_{M0} im Leiter 3 addiert sich aus den Einzelströmen der beiden Logikeingänge A und B, an die entsprechende Logiksignale gelegt werden können. Der Spannungsabfall U über dem magnetoresistiven Element ist der logische Ausgang.

[0036] Der Strom-Spannungsverlauf eines magnetoresistiven Elements 2 folgt direkt aus der Hysterese-Kurve der weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements und nimmt im Idealfall bei konstantem I_0 zwei diskrete Werte an, die zur Definition einer logischen "0" (U_0) und einer logischen "1" (U_1) dienen. Das Grundprinzip bzw. der prinzipielle Verlauf ist in den Fig. 4 und 5 anhand der Hysterese-Kurven dargestellt.

[0037] Zwei diskrete Stromwerte der Logikeingänge A und B werden als logische "1" ($I(1)$) und logische "0" ($I(0)$) definiert. Je nachdem, bei welchen Stromkombinationen bzw. den sich daraus ergebenden Strömen und damit Magnetfeldern über dem magnetoresistiven Element 2 die Umagnetisierung der weichmagnetischen Schicht und damit die Änderung der Spannung U von logischer "0" nach logischer "1" schaltet, definiert sich die Logikschaltung als OR-, NOR-, AND- oder NAND-Funktion.

[0038] Sind $I(0)$, $I(1)$, $U(0)$ und $U(1)$ einmal global festgelegt, dann definiert das Schaltverhalten und dabei konkret die Koerzitivfeldstärke H_k der weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements 2 die Funktion der logischen Schaltung. Ist H_k klein, so dass bereits eine logische "1" an einem der Eingänge A, B genügt, um von $U(0)$ nach $U(1)$ zu schalten, so liegt eine OR-Funktion vor (schaltet das Element von $U(1)$ nach $U(0)$, so liegt eine NOR-Funktion vor). Ist H_k so groß, dass an beiden logischen Eingängen eine logische "1" anliegen muss, damit das über den Leiter 3 erzeugte Magnetfeld hinreichend groß ist, so dass das magnetoresistive Element 2 ummagnetisiert und die Spannung schaltet, so liegt eine AND-Funktion vor (und entsprechend bei einem Umschalten von $U(1)$ nach $U(0)$ eine NAND-Funktion).

[0039] Durch geeignete Variation der Koerzitivfeldstärke H_k der weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements 2 kann somit die Logikschaltung 1 in ihrer Funktion definiert werden. Das Verhältnis der Koerzitivfeldstärke zur Höhe des über einen der Eingänge A oder B anliegenden Signalstroms bzw. dem hierüber erzeugbaren Magnetfeld definiert also die Funktion.

[0040] Die Erfindung macht sich nun den Umstand zunutze, dass mittels eines parallel oder antiparallel zur leichten magnetischen Richtung der magnetischen Schicht, die eine uniaxiale magnetische Anisotropie aufweist, und deren Schaltverhalten durch eine sogenannte Asteroide-Kurve charakterisiert wird, die Koerzitivfeldstärke betragsmäßig variiert werden kann. Material, Geometrie und Dimensionen der weichmagnetischen Schicht des magnetoresistiven Elements sind so gewählt, dass das Element ein Asteroide-Schaltverhalten zeigt und die Koerzitivfeldstärke in der leichten Richtung durch ein externes Magnetfeld variiert werden kann. Zu diesem Zweck ist ein besonderer Schichtaufbau des magnetoresistiven Elements vorgesehen. Für die hier vorliegende Erfindung ist das Asteroide-Schaltverhalten jedoch nicht notwendig; es ist im realen Bauelement wünschenswert, um hohe Schaltgeschwindigkeiten zu erreichen. [0041] Fig. 2 zeigt in einer Schnittdarstellung als Prinzip-

skizze das magnetoresistive Element 2. Dieses weist folgenden Schichtaufbau auf:

- weichmagnetische Schicht 4
- Tunnelbarriere 5
- künstlicher Antiferromagnet 6 (AAF = Artificial Antiferromagnet)
- elektrische Zuleitung 7
- zusätzliche magnetische Schicht 8
- Buffer-Schicht 9
- Substrat 10.

[0042] Die magnetische Schicht 8 weist eine Magnetisierung M auf, die im gezeigten Beispiel parallel zur leichten Richtung L der weichmagnetischen Schicht 4 steht. Die Magnetisierung M der magnetischen Schicht 8 erzeugt ein Offset-Feld H_{offset} , das im gezeigten Beispiel antiparallel zur leichten Richtung L der weichmagnetischen Schicht 4 steht. Diese antiparallele Ausrichtung des Offset-Felds H_{offset} zur leichten Richtung L, in die die Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht 4, also der Schalt- oder Speicherschicht beim Schalten dreht, wirkt also dem Drehprozess entgegen. Dies führt dazu, dass zum Schalten eine höhere Feldstärke zu erzeugen ist. Fig. 4 zeigt den diesbezüglichen Hystereseverlauf, wobei hier die Spannung über den Strom aufgetragen ist. Beachtlich ist der idealisierte Hystereseverlauf nicht zentralsymmetrisch zum Nullpunkt des Koordinatensystems, sondern nach rechts verschoben. Das heißt, um von U_0 nach U_1 zu schalten ist eine relativ große Feldstärke erforderlich, die nur dann erzeugt werden kann, wenn an beiden Signaleingängen A und B ein Signal anliegt. In diesem Fall wäre also ein AND-Schaltung realisiert.

[0043] Anders sind die Verhältnisse bei dem in Fig. 3 gezeigten magnetoresistiven Sensorelement, das dem aus Fig. 2 vom Aufbau her entspricht. Jedoch ist die Magnetisierung M der magnetischen Schicht 8 hier antiparallel zur leichten Richtung L der weichmagnetischen Schicht 4 ausgerichtet. Das von der Magnetisierung M erzeugte Offset-Feld H_{offset} verläuft hier parallel zur leichten Richtung L, das heißt, es verstärkt bzw. unterstützt eine Drehung der beispielsweise im Ausgangszustand entgegen der leichten Richtung L stehenden Magnetisierung beim Drehen in die leichte Richtung.

[0044] Die zugehörige Hysteresekurve zeigt Fig. 5. Beachtlich ist hier die Hysteresekurve nach links verschoben im Vergleich zur Hysterese nach Fig. 4. In diesem Fall ist eine OR-Schaltung realisiert, da zum Schalten der Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht 4 lediglich ein Signal an einem der Eingänge A oder B ausreicht.

[0045] Je nachdem, wie die Magnetisierung M der magnetischen Schicht 8 bezüglich der Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht also ausgerichtet ist, kann ein AND- oder ein OR-Logikelement realisiert werden.

[0046] In den Fig. 4 und 5 ergibt sich die AND- bzw. die OR-Funktion bei fester Richtung der Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht jeweils dann, wenn von U_0 auf U_1 geschaltet wird. Wird in die jeweils andere Richtung von U_1 auf U_0 geschaltet, so zeigt das magnetoresistive Element gemäß Fig. 2 und 4 ein NOR-Verhalten, während das magnetoresistive Element gemäß Fig. 3 und 5 ein NAND-Verhalten zeigt.

[0047] Die Einstellung der Magnetisierung M und damit die Feldprogrammierung erfolgt durch Bestromen des Leiters 3. An einen oder beiden Eingängen A und B wird ein so hoher Strom gelegt, dass ein Magnetfeld erzeugt wird, das auf die magnetische Schicht 8 einwirkt und größer als deren Koerzitivfeldstärke ist. Je nach Vorzeichen des eingepprägten Stromes und damit der Richtung des erzeugten Einstellfeld-

des richtet sich die Magnetisierung M entweder parallel oder antiparallel zur leichten Achse L der weichmagnetischen Schicht 4 aus. Die Magnetisierung M steht also senkrecht zur Magnetfeldleiterbahn 3. Dabei ist die magnetische

Schicht 8 derart dimensioniert und bemessen und aus einem entsprechenden Material gewählt, dass zum einen ihre Koerzitivfeldstärke deutlich größer ist als die Koerzitivfeldstärke der weichmagnetischen Schicht. Hierdurch wird vermieden, dass die Magnetisierung M durch das normale Schalten der Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht 4 beeinflusst oder geändert wird. Darüber hinaus muss die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht 8 auch wesentlich kleiner als die Koerzitivfeldstärke einer hartmagnetischen Referenz- oder Biaschicht des AAF-Systems 6 sein. Denn es muss sichergestellt sein, dass die Magnetisierung dieser Referenz- oder Biaschicht während des Programmierens der magnetischen Schicht 8 und damit der Ausrichtung der Magnetisierung M nicht geändert wird. Beispielsweise ist die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht 8 viermal größer als die der weichmagnetischen Schicht 4 und zwanzigmal kleiner als die der hartmagnetischen Referenz- oder Biaschicht.

[0048] Weiterhin ist zum einen die magnetische Schicht natürlich auch derart zu dimensionieren und zu bemessen und zum anderen die Geometrie und Dimension des magnetoresistiven Elements, dass das erzeugte Streufeld oder Offset-Feld H_{offset} im Bereich der weichmagnetischen Schicht einerseits möglichst homogen und andererseits hinreichend groß ist, um einen die Hysterese ausreichend verschiebenden Einfluss auf die Koerzitivfeldstärke der weichmagnetischen Schicht 4 zu haben. Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, dass die Position der magnetischen Schicht 8 im Schichtsystem des magnetoresistiven Elements frei wählbar ist, solange ihre Magnetisierung mit einem über den Leiter 3 geführten Strom geschaltet werden kann und ihr magnetostatisches Feld derart groß ist, dass die Hysterese qualitativ wie in den Fig. 4 und 5 gezeigt verschoben werden kann. Es ist also durchaus auch denkbar, die magnetische Schicht nach der weichmagnetischen Schicht 4 aufzubringen, wobei eine oder mehrere isolierende Zwischenschichten dazwischengesetzt werden.

[0049] Als Material der zusätzlichen magnetischen Schicht 8 kann z. B. CoFe verwendet werden, denkbar sind aber auch andere weichmagnetische Materialien. Ebenso muss das hartmagnetische System 6 kein AAF-System sein, sondern kann auch eine Einzelschicht oder ein durch Exchange-Bias gebildetes System sein. Es sind also beliebige Variationsmöglichkeiten denkbar, solange das Grundziel erreicht wird, nämlich die qualitative Verschiebung der Hysterese bei einem funktionierenden magnetoresistiven System, so dass dies für eine feldprogrammierbare Logik ausgenutzt werden kann.

[0050] Nachfolgend wird ein Beispiel gegeben, wie die logischen Ein- und Ausgänge definiert werden können:

[0051] Die logischen Eingänge sind definiert:

logische "1": $I(1) = I$

logische "0": $I(0) = -0,5 I$.

[0052] Die logischen Ausgänge sind definiert:

logische "1": $U(1) = U_1$

logische "0": $U(0) = U_0$.

[0053] Bevor eine logische Funktion ausgeführt wird ist das magnetoresistive Element 2 in einen definierten Ausgangszustand zu bringen, wobei in diesem Ausführungsbeispiel an beiden Eingängen eine logische 0 angelegt wird (reset-Funktion). Es liegt also an beiden Eingängen A und B ein Strom $I(0) = -0,5 I$ an. Mit diesen Definitionen und dem in den Fig. 4 und 5 gezeigten Schaltverhalten folgt, dass durch Programmierung der magnetischen Schicht 8 mit ei-

nem Strom von z. B. $+4 \text{ I}$ das magnetoresistive Element als AND-Funktion (Fig. 4) und mit einem Strom von -4 I als OR-Funktion (Fig. 5) definiert werden kann. Der Faktor 4 ist hier willkürlich gewählt und setzt voraus, dass die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht 8 ca. viermal so groß ist wie die Koerzitivfeldstärke der weichmagnetischen Schicht 4.

[0054] Bezogen auf Fig. 4 muss also zum Schalten der Magnetisierung der weichmagnetischen Schicht 4 und damit zum Schalten von U_0 auf U_1 an beiden Eingängen A und B ein Strom von $0,5 \text{ I}$ anliegen, während es bei der in Fig. 5 gezeigten Hysterese ausreichend ist, wenn entweder am Eingang A oder am Eingang B ein Strom von $0,5 \text{ I}$ anliegt.

[0055] Fig. 6 zeigt eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Logikschaltungsanordnung 11. Diese entspricht insoweit der Logikschaltungsanordnung 1 aus Fig. 1, jedoch ist hier zum einen ein weiterer Leiter 12 vorgesehen, der zum Erzeugen eines Magnetfelds dient, das senkrecht zur Magnetisierung des hartmagnetischen Schichtsystems 6 steht. Dieses Feld kann entweder kleiner als die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht 8 sein, d. h., es lässt deren Magnetisierung unbeeinflusst. Wird dieses Feld über den weiteren Leiter 12 angelegt, so führt dies dazu, dass die in den Fig. 4 und 5 gezeigte Hysteresekurve schmaler wird. Darüber hinaus kann über den weiteren Leiter 12 ein so hohes Magnetfeld angelegt werden, dass die Magnetisierung der magnetischen Schicht 8 in Richtung dieses senkrecht stehenden Feldes gedreht wird. Das senkrechte Magnetfeld würde in diesem Fall kontinuierlich auch ohne Bestromen des weiteren Leiters 12 anliegen.

[0056] Weiterhin ist hier ein zweites magnetoresistives Referenz-Element 13 vorgesehen, oberhalb welchem ebenfalls elektrisch isoliert ein Leiter 14 verläuft, so dass auch hier das Referenz-Element 13 mit einem Magnetfeld geschaltet wird wie das eigentliche Messelement 2. Der Aufbau des Referenz-Elements hinsichtlich der Schichtfolge etc. entspricht dem des eigentlichen Messelements 2. Über das magnetoresistive Referenz-Element 13, bei dem ebenfalls ein kontinuierlicher Strom $I(0)$ anliegt, wird gleichermaßen eine Referenzspannung U_R abgegriffen, die im Idealfall im Bereich $U_{\text{max}} < U_R < U_{\text{min}}$ liegt, wobei U_{max} , U_{min} der maximale bzw. minimale Spannungsabfall im Element 2 bei Strom $I(0)$ ist.

[0057] Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Erfindung eine feldprogrammierbare Logikschaltungsanordnung angibt, die wesentlich weniger Filzele benötigt und mithin auf einer geringeren Filzele auf dem Wafer aufgebaut werden kann. Weiter kann sie auf einfache Weise jederzeit in ihrer Funktion umgeschaltet werden, da hierzu lediglich die Magnetisierung M der magnetischen Schicht 8 umgedreht werden muss.

Patentsprüche

1. Logikschaltungsanordnung (1) mit mindestens einem magnetoresistiven Element (2) mit einer hartmagnetischen Schicht und einer weichmagnetischen Schicht (4), dem ein Leiter (3) mit mindestens zwei Signalleitungen (A, B) zugeordnet ist, mittels dem im stromdurchflossenen Zustand ein auf das magnetoresistive Element (2) einwirkendes Magnetfeld erzeugbar ist, mittels dem die Magnetisierung (M) der weichmagnetischen Schicht (4) des magnetoresistiven Elements (2) umschaltbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass das magnetoresistive Element (2) wenigstens eine weitere magnetische Schicht (8) aufweist, die ein auf die Magnetisierung (M) der weichmagnetischen Schicht (4) einwirkendes magnetisches Offsetfeld (H_{off}) erzeugt.

2. Logikschaltungsanordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Offsetfeld im Wesentlichen parallel, antiparallel oder senkrecht zur Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht (6) steht.

3. Logikschaltungsanordnung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Richtung der Magnetisierung der magnetischen Schicht und damit die Richtung des Offset-Felds durch wenigstens ein externes Magnetfeld einstellbar ist.

4. Logikschaltungsanordnung nach Anspruch 2 und 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetisierung (M) der magnetischen Schicht (8) in die parallele oder antiparallele Stellung durch ein von dem stromdurchflossenen Leiter (3) erzeugbares Magnetfeld einstellbar ist.

5. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht (8) größer ist als die maximale Feldstärke des zum Schalten der weichmagnetischen Schicht (4) erzeugbaren Magnetfelds.

6. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Koerzitivfeldstärke der magnetischen Schicht (8) kleiner ist als die Koerzitivfeldstärke der hartmagnetischen Schicht (6) des magnetoresistiven Elements (2).

7. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein weiterer Leiter (12) vorgesehen ist, mittels dem ein im Wesentlichen senkrecht zur Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht (6) stehendes Magnetfeld erzeugbar ist.

8. Logikschaltungsanordnung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetisierung (M) der magnetischen Schicht (8) mittels des weiteren Leiters (12) in die senkrechte Stellung einstellbar ist.

9. Logikschaltung nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetisierung der magnetischen Schicht in eine andere Richtung als die parallele, die antiparallele oder die senkrechte Stellung durch Überlagerung der mittels des Leiters (3) und des weiteren Leiters (12) erzeugbaren Magnetfelder einstellbar ist.

10. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Vielzahl von arrayartig angeordneten magnetoresistiven Elementen (2) mit zugeordneten Leitern (3) aufweist.

11. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das magnetoresistive Element (2) ein GMR- oder ein TMR-Sensor ist.

12. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die magnetische Schicht (8) und gegebenenfalls der weitere Leiter (12) derart dimensioniert und angeordnet sind, dass die von ihnen erzeugten Magnetfelder im Wesentlichen homogen auf die weichmagnetische Schicht (4) einwirken.

13. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein oder mehrere magnetoresistive Elemente (2) ein magnetoresistives Referenzelement (13) zugeordnet ist, das in seinem Aufbau dem das magnetoresistive Element (2) entspricht und dem ein Leiter (14) zugeordnet ist.

14. Logikschaltungsanordnung nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass dem magnetoresistiven Element (2) ein Verstärkerele-

ment zugeordnet ist.

15. Logikschaltungsanordnung nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere weitere, dem magnetoresistiven Element zugeordnete, über- und/oder nebeneinander liegende und elektrisch voneinander isolierte Leiter vorgesehen sind. 5

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

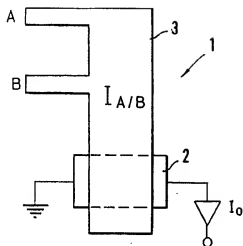


FIG. 1

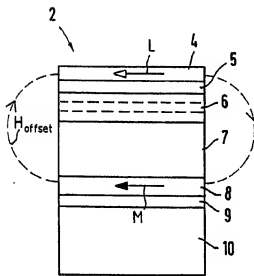


FIG. 2

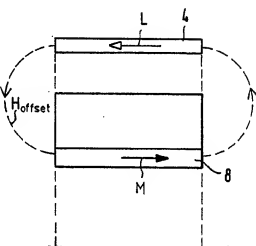


FIG. 3

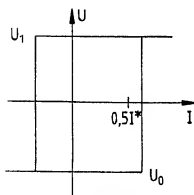


FIG. 4

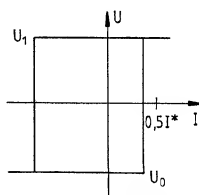


FIG. 5

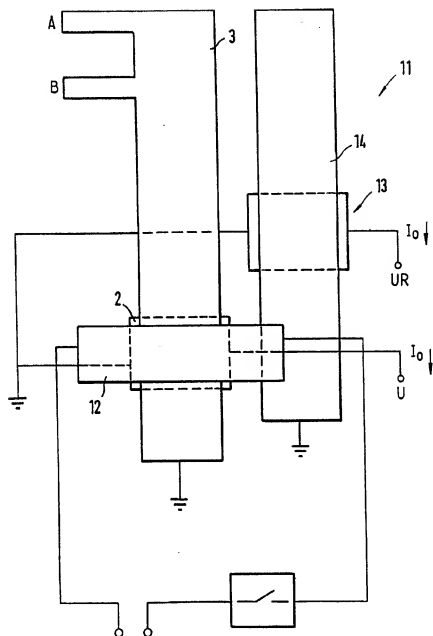


FIG. 6